


간편 스크래치 공정을 이용한 마찰전기 하베스터의 출력 향상

허승현, 황건태 

부경대학교 융합소재공학부 재료공학전공

The Output Enhancement of a Triboelectric Harvester Using a Simple Scratch Process

Seung-Hyun Heo and Geon-Tae Hwang

Department of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

(Received March 4, 2025; Revised March 10, 2025; Accepted March 11, 2025)

Abstract: With the extensive industrial growth driven by the Fourth Industrial Revolution and the excessive use of fossil fuels, greenhouse gas emissions have accelerated global warming. Energy harvesting technologies have garnered significant attention as a potential solution to this issue. Among them, triboelectric nanogenerators (TENGs) have emerged as promising candidates for energy collection and conversion. However, TENGs typically face limitations in providing an efficient energy supply due to their high output voltage and low output current. To overcome these challenges, numerous studies have explored various methods to enhance the output performance by increasing the surface area of the triboelectric materials. Herein, we report a high-output TENG fabricated through a simple scratch process. By utilizing sandpaper, typically used for abrasion or polishing, the surface roughness of the triboelectric material PFA was increased through surface scratching. The surface-engineered TENG, prepared through this simple and rapid process, demonstrated enhanced output characteristics with a voltage of 276 V and a current of 72 μ A, showing a 21% increase in voltage and a 41% increase in current compared to the non-engineered counterpart, providing sufficient energy to power an LED. These results indicate that the scratch-based surface modification process using sandpaper offers an effective solution for improving triboelectric output performance, establishing TENGs as a key contributor to sustainable energy supply.

Keywords: Simple scratch process, Triboelectric harvesting, Sustainable energy supply

최근 지구 온난화로 인한 기후 변화는 해수면 상승, 이상 기후 현상, 생태계 파괴 등 전 세계적으로 심각한 영향을 미치고 있다 [1]. 이러한 문제의 주요 원인 중 하나는 화석 연료의 과도한 사용에 따른 온실가스 배출로, 전통적인 에너지 생산 방식은 지속 가능하지 않으며 지구 온난화를 가속화시키고 있다 [2]. 더욱이, 인공지능, 웨어러블 전자 기기, 건강 모니터링 장비, 스마트 센서 등 사물인터넷

(IoT) 기기의 급속한 발전은 에너지 소비량의 급격한 증가를 초래하고 있다 [3].

이와 같은 지구 온난화와 4차 산업혁명에 따른 산업의 광범위한 성장 속에서, 친환경적이고 지속 가능한 에너지 공급원의 개발이 절실히 요구되고 있다 [4]. 이러한 문제를 해결하기 위한 혁신적인 접근법으로 에너지 하베스팅 기술이 주목받고 있다 [5]. 에너지 하베스팅은 주변 환경에서 에너지를 수집하고 이를 전력으로 변환하여 에너지를 공급하는 기술로, 태양광, 진동, 열, 마찰 등 다양한 에너지원으로부터 전력을 생산할 수 있다 [6,7].

특히 마찰전기 나노발전기(triboelectric nanogenerator,

✉ Geon-Tae Hwang; gthwang@pknu.ac.kr

Copyright ©2025 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

TENG)는 최근 에너지 수집 및 변환 분야에서 많은 주목을 받고 있다 [8]. 이 기술은 주변의 작은 기계적 진동을 효과적으로 전기에너지로 변환할 수 있는 고효율 에너지 변환 장치로, 저비용과 높은 출력 밀도를 갖추고 있어 지속적인 에너지 공급을 가능하게 하며 다양한 응용 분야에 적용될 수 있다 [9]. 마찰전기 효과는 일반적으로 두 개의 서로 다른 물체가 접촉할 때, 대전열의 차이에 의해 각각의 물질에서 전하의 극성이 반대로 대전되며 전기 이중층이 형성되는 현상이다 [10]. 이후 물체가 분리되면 전기 이중층 내부의 분극 모멘트 변화에 의해 전위차가 발생하게 되고, 이를 상쇄하기 위해 두 물체의 인접한 전극 간에 전자 이동이 발생하면서 마찰전기 발전이 이루어진다 [11]. 그러나 마찰전기 발전 소자는 비교적 높은 출력 전압(수백 V)과 낮은 출력 전류(수십 μA)로 인해 효율적인 에너지 공급에 한계가 있다 [12].

마찰전기 발전 소자의 출력 특성은 마찰대전체의 표면적이 클수록 유도되는 전하량이 증가하여 성능이 더욱 향상될 수 있다 [13]. 이를 실현하기 위해, 많은 연구에서는 마찰전기 발전 소자의 표면적을 극대화하는 다양한 방법을 모색하고 있다 [14]. 대표적인 표면적 향상 방법으로는 플라즈마 처리, 나노/마이크로 패터닝, 그리고 다양한 표면 처리 기술이 있다 [15]. 플라즈마 처리는 마찰대전체의 표면에 미세한 구조를 형성하여 표면 거칠기를 증가시키고, 이를 통해 마찰전기 발전의 출력을 향상시키는 효과를 제공한다 [16]. 이 방식은 플라즈마로 표면에 화학적 반응을 유도해 접촉 면적을 증가시키며, 나노 및 마이크로 수준의 표면 처리가 가능하다는 장점이 있다. 나노 및 마이크로 패터닝 기술은 마찰대전체의 접촉 면적을 넓혀 더 많은 전하를 유도할 수 있으며, 이를 통해 에너지 변환 효율을 크게 개선할 수 있다 [17]. 하지만 일반적인 나노 및 마이크로 패터닝 기술은 높은 수준의 기술력과 장비가 요구되며, 공정 시간이 길어질 수 있다는 단점이 있다. 그 방법 중 하나로 수치제어 밀링을 사용해 정밀한 패턴이 형성된 금형을 제작한 후, 이를 임프린팅 공정을 통해 마찰대전체 표면에 전사하는 방식이 적용되는데, 이러한 과정은 시간 소모가 크고 상대적으로 고도화된 기술을 요구한다 [18].

본 연구에서는 비교적 저렴하고 고도의 기술력이 필요하지 않으며, 간단한 방법으로 표면 거칠기를 증가시킬 수 있는 사포(sandpaper)를 사용하여 perfluoroalkoxy (PFA) 표면의 형상을 개조하였다. 사포를 이용한 표면 거칠기 증가는 마찰전기 발전 성능 향상에 기여할 수 있다는 점에 주목하였다. PFA는 높은 전기적 절연성과 낮은 표면 에너지를 가져 마찰전기 발전에 적합한 재료로 알려져 있다. 이 연구에서는 PFA의 표면 거칠기를 제어함으로써 마

찰전기 발전 성능의 변화를 확인하고자 하였다. 또한, 양의 대전열에 속하는 알루미늄과 음의 대전열에 속하는 PFA를 마찰대전체로 사용하여 고효율/고성능 마찰전기 발전기를 제작하였다.

먼저, PFA 표면의 거칠기 변화를 사포를 사용해 유도하였다. 매끄러운 표면을 갖는 PFA와 사포로 표면을 가공한 후 거칠기를 증가시킨 PFA표면에서 마찰전기 발전기의 출력 특성을 각각 비교 분석한 결과, 매끄러운 표면의 경우 228 V, 51 μA 의 출력을 기록하였고, 거칠기를 증가시킨 경우 276 V, 72 μA 의 출력을 얻을 수 있었다. 이는 표면 거칠기 증가로 인해 전압은 약 21%, 전류는 약 41% 향상된 수치를 나타냈다. 이후, 표면 거칠기를 증가시킨 마찰전기 소자와 그렇지 않은 소자를 이용해 LED에 직접 에너지를 공급 후 출력 특성에 따른 그 차이를 비교 분석하였다. 그 결과, 표면 거칠기를 증가시킨 마찰전기 소자가 더 밝은 빛을 발현시킬 수 있었다. 이는 간편 스크레치 공정을 통해 증가한 표면 거칠기가 마찰전기 발전 시 접촉면적의 증가로 이어지며, 이로 인해 출력특성이 더욱 향상되었으므로 이해해볼 수 있다. 표면 거칠기의 증가는 마찰전기 발전 시 접촉면적의 증가로 이어졌으며, 이로 인해 전하 생성량과 전위차가 함께 증가한 것으로 분석된다 [19].

그림 1(a)는 사포를 이용한 PFA 표면 형상 변형 공정과 최종적으로 제작된 마찰전기 발전소자의 전체 모식도를 나타낸다. 마찰 대전체로는 저렴한 비용으로 쉽게 구할 수 있는 알루미늄과 테프론의 일종인 PFA를 이용하였다. 사용된 알루미늄은 일상생활에서 쉽게 구할 수 있는 두께 50 μm 의 알루미늄 호일을 이용하였으며, 이는 양의 대전열에 속하는 재료로 PFA와 접촉 시 전자를 내어주어 양전하로 대전된다. 반면, PFA는 음의 대전열에 속하여 전자를 얻어 음전하로 대전되기 쉬우며, 이로 인해 두 재료 간에 전위차가 형성되고 마찰전기 발전이 이루어진다 [10]. PFA는 높은 전기적 절연성과 낮은 표면 에너지를 갖고 있어, 다양한 전자기기 및 공학적 응용 분야에서 널리 사용되는 불소계 고분자이다 [20]. PFA의 높은 전기적 절연성은 마찰전기 발전에 의해 생성된 전하를 오랫동안 유지하며 누설을 방지하여 더 큰 전위차를 유지할 수 있게 한다. 또한, PFA의 구성원소 중 하나인 플루오린은 전기 음성도가 3.98로 모든 원소 중 가장 높으며, 이는 주변 전자를 강하게 끌어당겨 전자와의 결합으로 인해 낮은 표면 에너지를 형성하게 한다 [21]. 이러한 낮은 표면 에너지는 마찰전기 발전 시 전자가 다른 표면으로 쉽게 이동할 수 있도록 하며, PFA는 마찰 시 음전하를 쉽게 얻어 음의 대전체가 되기 쉽다. 이와 같은 특징은 마찰전기 발전에서 높은 출력을 얻기 위해 중요한 요소이다. PFA와 함께 마찰대전체로 사용할 수 있

는 다른 재료로는 polyvinyl chloride (PVC), polyvinylidene chloride (PVDC), polyvinylidene fluoride (PVDF) 등도 있으며, 이러한 재료들은 플루오린과 같은 할로젠 원소를 포함하여 높은 전기 음성도를 보여 음극 마찰대전체로 널리 사용된다. 마찰전기 발전의 높은 출력을 위해서는 두 물질 간 접촉이 일어났을 때 서로 반대 부호를 갖는 극성으로 대전되려는 성향이 강해야 하며, 따라서 마찰대전열(triboelectric series)에서 상대적으로 멀리 떨어진 알루미늄과 PFA를 이용하였을 때 높은 출력 특성을 기대해볼 수 있다 [22]. 마지막으로, 그림 1(a)의 왼쪽 이미지는 사포를 사용하여 PFA 표면 거칠기를 증가시키는 공정을 도식화한 것이며, 오른쪽 이미지는 유연한 PET 기판 위에 PFA와 알루미늄을 결합하여 제작된 최종 마찰전기 발전소자의 이미지를 보여준다. 사포는 모래 알갱이가 붙어 있는 천으로 연마하거나 갈아내는데 주로 사용하는 재료이다. 낮은 번호를 갖는 사포일수록 높은 거칠기를 갖는데 이를 반복적으로 문지르게 되면 거친 사포의 표면적이 PFA 표면을 긁어 내면서 PFA의 표면 거칠기가 증가하게 된다. 이를 통해 제작된 소자는 간단한 공정을 통해 마찰전기 발전 효율을 극대화할 수 있는 가능성을 보여주었다.

그림 1(b)는 실제로 제작된 마찰전기 발전소자의 모습을 보여준다. PFA의 뒷면에는 생성된 전하를 효율적으로 이동시키기 위해 전기전도도가 우수한 Au를 코팅하였으며,

사포로 표면을 가공한 결과, PFA 표면이 울퉁불퉁하게 변화된 것을 육안으로 확인할 수 있었다. 알루미늄은 자체적으로 전기적 전도성을 가지고 있기 때문에 추가적인 전극 코팅을 시행하지 않아도 전하의 이동이 원활하다. 이 두 재료는 내구성이 뛰어나고 유연성 또한 탁월하기 때문에 유연한 플라스틱 기판에서도 높은 출력 특성을 나타내어, 본 연구에서는 마찰대전체로 적합하다고 판단하였다. 제작된 마찰대전체는 $3 \times 6 \text{ cm}^2$ 크기로 제작되었으며, 이를 결합한 플라스틱 기판은 여유 공간을 포함하여 $3 \times 6 \text{ cm}^2$ 크기로 구성되었다.

그림 1(c)는 주사전자현미경(scanning electron microscopy, SEM)을 사용하여 사포 가공 직후의 PFA 단면을 관찰한 이미지이다. 외곽 이미지는 100배 배율로 관찰된 것이며, 오른쪽 가장자리에 위치한 이미지는 이를 1,500배로 확대한 것이다. 확대된 이미지에서 PFA 표면이 나뭇잎 모양과 유사하게 불규칙적으로 울퉁불퉁한 형상을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 표면 형상은 매끄러운 표면보다 더 넓은 접촉 표면적을 제공하여 마찰전기 발전 시 더 많은 전하를 유도하게 되며, 이는 발전기의 출력 특성을 향상시키는 결과로 이어진다. 따라서, 마찰대전체의 표면적을 확장하기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있으며, 본 연구에서 사용한 사포를 통한 기계적 표면 가공 방법은 저비용, 단시간 내 표면적을 효과적으로 증가시킬

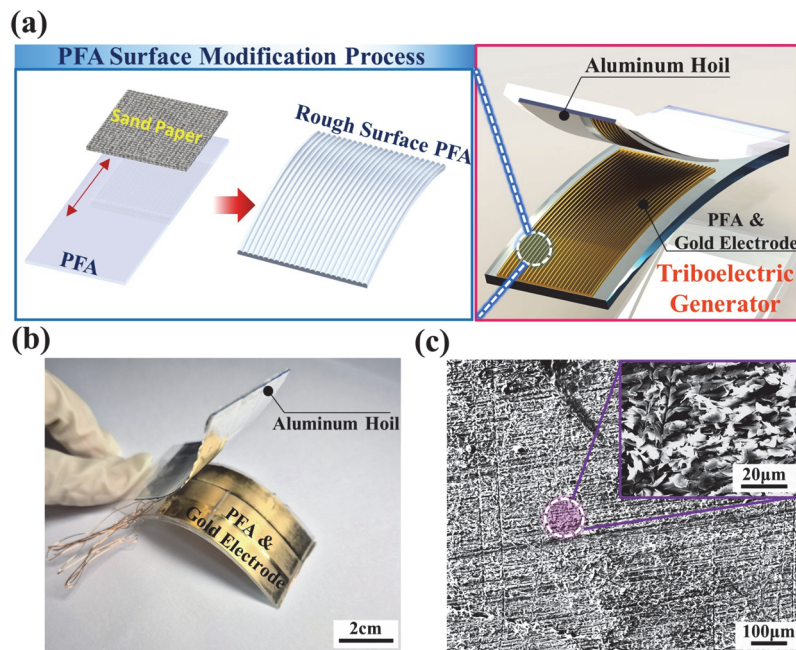


Fig. 1. (a) Schematic representation of the complete manufacturing process for surface-engineered TENG, (b) a photograph of the actual surface-engineered TENG device, displaying its flexible structure with visible arches, and (c) SEM image of surface engineered PFA film.

수 있는 장점이 있다. 비록 나노 또는 마이크로 패터닝과 비교했을 때 표면 형상의 균일성은 다소 떨어질 수 있으나, 이 방법의 실용성과 효율성은 SEM 이미지를 통해 뚜렷하게 확인할 수 있다.

그림 2(a)는 마찰전기 발전의 동작 원리를 보다 구체적으로 설명하고 있다. 마찰전기 발전의 동작 메커니즘은 크게 슬라이딩 모드와 접촉-분리모드로 나뉘며, 본 연구에서는 접촉-분리 모드를 이용하였다. 이 방법에서 마찰전기 발전의 동작 과정은 세 단계로 나뉜다. 첫 번째는 접촉 전 상태, 두 번째는 접촉 직후 상태, 마지막으로 접촉 후 분리 상태이다. 그림 2(a)-i는 두 마찰대전체가 접촉되기 전의 상태를 나타낸다. 이 상태에서 접촉이 이루어지면 마찰대전체 사이의 대전열 차이에 의해 표면에 국부적인 분극 현상이 발생한다. 접촉 시에는 양전하와 음전하가 서로 접촉해 전기적 중성을 이루며, 이는 그림 2(a) 가운데 이미지에서 나타난다. 그림 2(a)-ii는 마찰대전체가 접촉된 후 분리되는 상태를 나타내며, 이 과정에서 전기적 중성이 깨지면

서 전위차가 발생하여 전하들이 인접한 전극으로 이동하게 된다. 이러한 접촉-분리 과정이 반복됨에 따라 마찰전기 발전이 발생하며, 생성된 전류는 외부 도선을 통해 흐르게 된다. 이 과정은 반복될수록 더 많은 전하가 유도되어 출력이 증가하게 된다.

그림 2(b)와 2(c)는 표면 거칠기에 따른 마찰전기 발전 소자의 출력 특성(전압, 전류)을 비교 분석한 결과이다. 평평한 표면과 사포로 가공한 거친 표면의 출력 특성은 평평한 PFA 표면을 사용한 경우 전압은 228 V, 전류는 51 μ A를 기록하였으나, 사포로 표면을 거칠게 가공한 PFA 표면에서는 전압 276 V, 전류 72 μ A로 측정되었다. 이는 거친 표면을 갖는 PFA가 평평한 표면에 비해 전압은 약 21%, 전류는 약 42% 더 향상된 결과를 나타냈다. 이와 같은 결과는 사포를 사용해 표면 거칠기를 증가시킨 것이 마찰대전체의 접촉 표면적을 확장시켰기 때문이며, 더 많은 전하가 유도되어 출력이 증가한 것으로 해석할 수 있다 [14-16].

그림 2(d)는 표면 형상에 따른 순간최대(peak) 파워를 측정된 결과이다. 출력 전압 신호를 외부 부하 저항 1 k Ω 에서 500 M Ω 까지 변화시키며 측정하였고, 저항이 증가할수록 출력 전압도 비례적으로 증가하는 경향을 보였다. 표면처리 전/후에 최대 저항 500 M Ω 에서 각각 230 V와 280 V의 최대 전압을 기록하였다. 순간최대 파워는 식 (1)을 통해 계산되었으며, 그 결과는 그림 2(e)에 나타나 있다. 이는 표면 형상의 차이에 따라 파워가 얼마나 달라지는지를 나타내며, 사포처리 된 샘플이 처리 전 샘플에 비해 더 높은 출력 특성을 보였다 [23].

$$v^2/R \tag{1}$$

측정한 저항과 전압 값을 식 (1)에 대입함으로써 파워 값을 계산할 수 있다. 여기서 R은 저항을, V는 각 저항별로 측정된 전압 값을 나타낸다. 파워 특성은 에너지를 얼마나 크게 생성할 수 있는지를 보여주는 중요한 요소이며, 순간적인 출력을 요구하는 다양한 응용 상황에서 고려해야 할 중요한 성능 지표이다 [22]. 외부 저항이 연결되면, 낮은 저항에서는 전류가 저항을 통해 흐르며 전압 강하 현상이 발생하게 된다. 파워 특성이 뛰어나도록 이러한 전압 강하 현상이 줄어들어 높은 효율을 유지할 수 있다. 그림 2(e)에서 확인할 수 있듯이, 마찰전기 발전소자는 5 M Ω 에서 최대의 피크 파워를 얻었으며, 표면처리 된 경우 2 mW의 출력으로 대조군의 1 mW에 비해 두 배 더 우수한 파워 특성을 보였다. 이는 단시간의 사포 가공을 통해 PFA 표면 형상을 조정함으로써 전압과 전류뿐만 아니라 파워 특성까지도 크

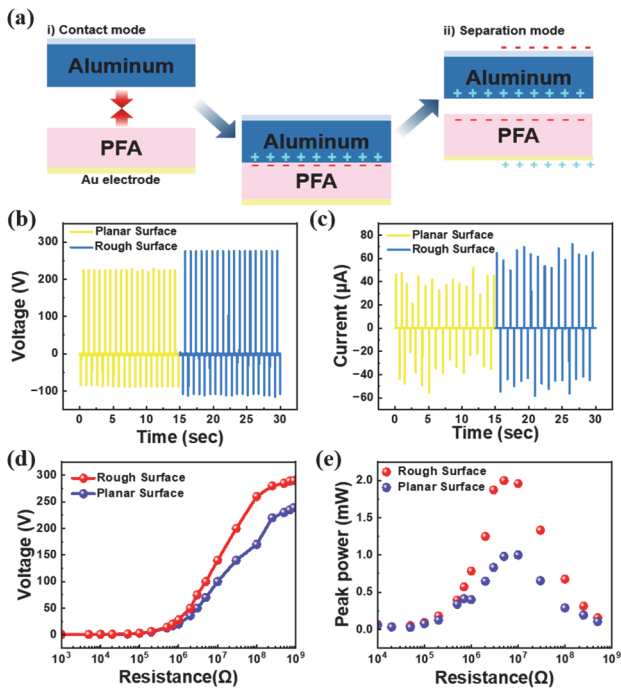


Fig. 2. (a) Principle of triboelectric generation, (b) open-circuit voltage, (c) short-circuit current were measured to compare the triboelectric output performance between the surface-engineered(W/) and non-surface engineered(W/O) PFA film, (d) the measured absolute peak voltages under different load resistance varying from 1 k Ω to 500 M Ω for TENGs without surface engineered and with surface engineered, and (e) the peak powers calculated from multiplying the peak voltage and load resistance for TENGs without surface engineered and with surface engineered.

게 향상시킬 수 있음을 의미한다.

그림 3(a)는 밴딩 머신을 이용해 마찰전기 나노발전기의 발전 과정을 시각적으로 나타낸 것이다. 그림 3(a)-i는 접촉 이전 상태로, 왼쪽에는 PFA, 오른쪽에는 알루미늄 마찰대전체가 위치해 있음을 보여준다. 상단 이미지는 마찰대전체가 접촉하기 전의 초기 상태를 나타내며, 이때 오실로스코프에 측정된 전압은 0 V이다. 밴딩 머신을 이용해 일정한 압력과 시간으로 접촉 및 분리가 반복되며, 그림 3(a)-ii는 접촉 후 분리 직전의 상태를 보여준다. 이 과정을 통해 마찰전기 발전이 이루어지며, 오실로스코프에서 측정된 전압 데이터는 마찰전기 발전이 접촉-분리 과정을 반복하면서 발생하는 교류 전압을 나타낸다. 마찰전기 발전에서 생성된 교류 에너지는 실제 전자 장치에 적용하기 위해 정류 과정이 필요하다 [24].

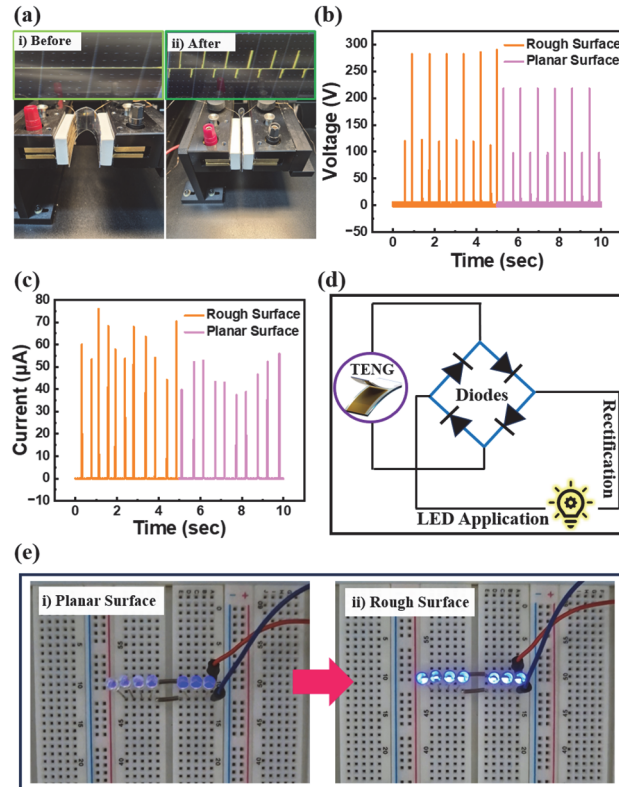


Fig. 3. (a) The actual image of the surface-engineered TENG attached to the bending machine designed to apply uniform force, is shown in (i) separation mode and (ii) contact mode. Rectified (b) open-circuit voltage and (c) current characteristics of surface-engineered TENG and non-engineered TENG, (d) circuit diagram of the electric rectifying and electronic application process, and (e) shows the results of directly powering an LED using TENG: (i) non-surface-engineered TENG and (ii) surface-engineered TENG.

그림 3(b)와 3(c)는 밴딩 머신을 통해 측정된 후 정류된 전압과 전류 결과를 보여준다. 정류 후에도 정류 전과 비슷한 최대 전압과 전류 값이 측정되었으며, 표면이 거친 하베스터는 290 V, 76 μ A, 대조군은 218 V, 56 μ A를 기록했다. 그림 3(d)는 교류 형태의 전기 에너지를 다이오드를 통해 정류하는 과정을 나타낸 회로도, 마찰전기 나노발전기, 다이오드, 그리고 light-emitting diode (LED)로 구성된 회로의 구성을 보여준다. 마찰전기 발전이 시작되면 다이오드를 통해 교류 전원이 직류로 변환되고, 이 전원이 LED에 공급되어 LED가 발광하게 된다.

그림 3(e)는 실제 LED 전구를 구동한 모습을 보여준다. 그림 3(e)-i는 표면처리전 샘플을 이용한 LED 구동 모습이며, 그림 3(e)-ii는 표면 스크레치 이후 하베스터를 이용한 LED 구동 모습을 나타낸다. 두 소자의 성능을 비교해보면, 스크레치를 가진 소자가 더 밝고 강한 LED 발광을 보였으며, 7개의 LED에 충분한 전기에너지가 공급되었음을 확인할 수 있다. 이는 사포를 이용한 간단한 표면 형상 변경이 짧은 시간 내에 마찰전기 발전 성능을 크게 향상시킬 수 있음을 증명하는 동시에, 마찰전기 발전소자가 실제 전자 분야에서 에너지원로서의 응용 가능성이 높다는 것을 시사한다.

본 연구에서는 마찰전기 발전소자의 성능을 향상시키기 위한 방안으로, PFA 마찰대전체의 표면 거칠기를 사포를 이용해 증가시키는 방법을 적용하여 고효율/고성능 마찰전기 발전소자를 제작하였다. 마찰전기 발전소자의 성능을 개선하기 위해 나노/마이크로 임프린팅, 플라즈마 처리 등의 다양한 고급 기술이 존재하지만, 본 연구는 저비용, 간단한 공정, 짧은 제작 시간을 특징으로 하는 사포를 활용하는 접근법에 중점을 두었다. 일반적으로 사포는 표면 연마에 사용되지만, 본 연구에서는 표면 거칠기를 증가시킴으로써 접촉 면적을 넓히고, 그에 따라 유도되는 전하량을 증가시켜 발전소자의 출력 특성을 향상시키는 역할을 하도록 설계되었다. 실험 결과, 스크레치 공정 전/후를 비교했을 때, 스크레치 공정 이후 전압이 21%, 전류가 42% 증가하였으며, 파워는 200% 향상된 것으로 나타났다. 또한, 마찰전기 발전소자를 이용해 LED를 구동한 실험에서는 스크레치를 적용한 발전소자가 더 밝은 빛을 발광하는 것을 확인할 수 있었다. 이로 인해, 본 연구에서 제안한 사포를 이용한 간편 스크레치 공정은 짧은 시간 내에 마찰전기 발전 성능을 크게 향상시킬 수 있는 효과적인 접근법임을 입증하였다. 특히, 마찰대전체로 사용된 알루미늄과 PFA는 저비용, 높은 내구성, 유연성을 갖춘 재료로, 다양한 형태의 마찰전기 소자로의 응용 가능성이 높다는 장점을 지닌다. 후속 연구에서는 사포를 활용한 표면 거칠기 증대 기술

과 다른 표면 처리 방법을 혼합하여 보다 혁신적이고 효율적인 기술을 개발할 수 있을 것이다. 이러한 기술의 발전을 통해 센서, 웨어러블 기기 등 다양한 전자기기 분야에서 마찰전기 발전의 실용화를 추구할 수 있을 것으로 보이며 마찰전기 발전기가 지속 가능한 에너지 공급원으로도 중요한 역할을 할 것으로 기대된다 [24-26].

ORCID

Geon-Tae Hwang

<https://orcid.org/0000-0001-6151-3887>

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2024년)에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- [1] K. Han, W. Tang, J. Chen, J. Luo, L. Xu, and Z. L. Wang, *Adv. Mater. Technol.*, **4**, 1800569 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1002/admt.201800569>
- [2] Z. Zhao, L. Zhou, S. Li, D. Liu, Y. Li, Y. Gao, Y. Liu, Y. Dai, J. Wang, and Z. L. Wang, *Nat. Commun.*, **12**, 4686 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25046-z>
- [3] Y. Yang, H. Zhang, R. Liu, X. Wen, T. C. Hou, and Z. L. Wang, *Adv. Energy Mater.*, **3**, 1563 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1002/aenm.201300376>
- [4] R. Liu, Z. L. Wang, K. Fukuda, and T. Someya, *Nat. Rev. Mater.*, **7**, 870 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41578-022-00441-0>
- [5] Y. Zhang, F. Wan, S. Huang, S. Wang, Z. Niu, and J. Chen, *Nat. Commun.*, **11**, 2199 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16039-5>
- [6] H. B. Radousky and H. Liang, *Nanotechnology*, **23**, 502001 (2012).
doi: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/23/50/502001>
- [7] G. T. Hwang, V. Annappureddy, J. H. Han, D. J. Joe, C. Baek, D. Y. Park, D. H. Kim, J. H. Park, C. K. Jeong, K. Park, J. J. Choi, D. K. Kim, J. Ryu, and K. J. Lee, *Adv. Energy Mater.*, **6**, 1600237 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1002/aenm.201600237>
- [8] C. K. Jeong, K. M. Baek, S. Niu, T. W. Nam, Y. H. Hur, D. Y. Park, G. T. Hwang, M. Byun, Z. L. Wang, Y. S. Jung, and K. J. Lee, *Nano Lett.*, **14**, 7031 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1021/nl503402c>
- [9] C. Wu, A. C. Wang, W. Ding, H. Guo, and Z. L. Wang, *Adv. Energy Mater.*, **9**, 1802906 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1002/aenm.201802906>
- [10] S. Pan and Z. Zhang, *Friction*, **7**, 2 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1007/s40544-018-0217-7>
- [11] J. Luo, W. Gao, and Z. L. Wang, *Adv. Mater.*, **33**, 2004178 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.202004178>
- [12] Z. L. Wang, *ACS Nano*, **7**, 9533 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1021/nm404614z>
- [13] M. Ibrahim, J. Jiang, Z. Wen, and X. Sun, *Nanoenergy Adv.*, **1**, 58 (2021).
doi: <https://doi.org/10.3390/nanoenergyadv1010004>
- [14] X. Cheng, B. Meng, X. Chen, M. Han, H. Chen, Z. Su, M. Shi, and H. Zhang, *Small*, **12**, 229 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1002/sml.201502720>
- [15] Y. Zou, J. Xu, K. Chen, and J. Chen, *Adv. Mater. Technol.*, **6**, 2000916 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1002/admt.202000916>
- [16] X. Cheng, B. Meng, X. Chen, M. Han, H. Chen, Z. Su, M. Shi, and H. Zhang, *Small*, **12**, 229 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1002/sml.201502720>
- [17] Y. Hu, X. Wang, H. Li, Z. Li, and N. Sun, *Langmuir*, **35**, 9396 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b01020>
- [18] P. Zhang, L. Deng, H. Zhang, J. He, X. Fan, and Y. Ma, *Adv. Mater. Interfaces*, **9**, 2201265 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1002/admi.202201265>
- [19] C. Li, Y. Bai, J. Shao, H. Meng, and Z. Li, *Small Methods*, **8**, 2301682 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1002/smt.202301682>
- [20] A. Chen, C. Zhang, G. Zhu, and Z. L. Wang, *Adv. Sci.*, **7**, 2000186 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1002/advs.202000186>
- [21] Y. S. Choi and S. Kar-Narayan, *EcoMat*, **2**, e12063 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1002/eom2.12063>
- [22] R. Zhang and H. Olin, *EcoMat*, **2**, e12062 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1002/eom2.12062>
- [23] M. Peddigari, J. H. Park, J. H. Han, C. K. Jeong, J. Jang, Y. Min, J. W. Kim, C. W. Ahn, J. J. Choi, B. D. Hahn, S. Y. Park, W. H. Yoon, D. S. Park, D. Y. Jeong, J. Ryu, K. J. Lee, and G. T. Hwang, *ACS Energy Lett.*, **6**, 1383 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.1c00170>
- [24] Y. Lim and G. T. Hwang, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **37**, 112 (2024).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2024.37.1.16>
- [25] K. W. Lim, M. Peddigari, C. H. Park, H. Y. Lee, Y. Min, J. W. Kim, C. W. Ahn, J. J. Choi, B. D. Hahn, J. H. Choi, D. S. Park, J. K. Hong, J. T. Yeom, W. H. Yoon, J. Ryu, S. N. Yi, and G. T. Hwang, *Energy Environ. Sci.*, **12**, 666 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1039/C8EE03008A>
- [26] J. Choi, H. Kim, S. Yoon, and C. K. Jeong, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **37**, 563 (2024).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2024.37.6.1>